

S-символьная среда искусственного интеллекта

А. В. Ильин, В. Д. Ильин,

Аннотация — В обзоре представлены концептуальные основы применения S-(символьно-кодowo-сигнальной) среды (S-среды) в качестве инфраструктурного основания систем искусственного интеллекта. S-(символы, коды, сигналы) и S-(символьные, кодовые и сигнальные) конструкции, их свойства, взаимосвязи и методы построения изучаются в теории S-символов, которая служит методологическим основанием построения S-среды. Дано определение интеллекта, рассмотрено функционирование механизмов интуиции и логического вывода в процессах решения хорошо и плохо определённых S-задач. Дано определение S-задачи, как объекта представления в S-среде функционирования систем искусственного интеллекта. Представлена точка зрения авторов на искусственный интеллект. Приведён критический анализ теста А. Тьюринга и сформулированы требования к подобным тестам.

Ключевые слова – S-символ; S-код; S-сигнал; S-среда; S-задача; интеллект; искусственный интеллект; представление S-задач в S-среде.

I. ВВЕДЕНИЕ

Изучая мир и себя, люди строят *символьные* (аудио-, видео- и др.) *модели сущностей*, отражающие изучаемые объекты и связи между ними. Эти модели представлены языками взаимодействия, спецификации и программирования; *цифровыми двойниками* (англ. *digital twins*) различных объектов [1-5] и др. Символьные модели служат не только средством познания, но и инструментарием, помогающим изобретать искусственные вещи, расширяющие и совершенствующие естественные возможности человека. Такой инструментарий принято относить к арсеналу *искусственного интеллекта*.

В наши дни люди и созданная ими техника действуют в *символьно-кодowo-сигнальной* среде (S-среде) [6-7], которая в современной реализации является *цифровой*. Для решения задач в различных сферах деятельности успешно применяются M2M-технологии (англ. Machine-to-Machine, M2M) [8-9], технологии облачных вычислений (англ. cloud computing) и электронных сервисов [10], Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT) [11] и *цифровых двойников*.

S-(символы, коды, сигналы) и S-символьные конструкции (языки спецификации, программы управления поведением S-машин и др.) называем S-

объектами. Их виды, типы, свойства, взаимосвязи и методы построения изучаются в *теории S-символов*², представляющей собой расширенное обобщение *теории символического моделирования (S-моделирования)* [12].

S-символ рассматривается как заменитель природного или изобретённого объекта, обозначающий этот объект и служащий элементом определённой системы построения S-сообщений (видео-, аудиосообщений или др.) в S-среде, рассчитанных на восприятие человеком или S-машиной [компьютером или компьютерным устройством (смартфоном, цифровой камерой или др.)]. Текст электронного документа, электронная географическая карта, видеоролик – всё это S-сообщения, файлы S-кодов которых хранятся на накопителях (SSD, жёстком диске и др.) S-машин. Шрифт Брайля для слепых – система фактурных S-символов для построения текстовых сообщений, рассчитанных на восприятие осязанием пальцами рук; нотное письмо, система нотных S-символов – средство построения музыкальных аудиосообщений, представленных в графической форме, а система S-символов шахматной нотации – средство записи шахматных партий в виде текстовых сообщений. Русский алфавит вместе со знаками препинания – система текстовых S-символов для построения сообщений по правилам грамматики русского языка (а каждый элемент алфавита является заменителем звука, применяемого в речевых сообщениях).

S-код служит заменителем S-символа, S-символьного сообщения, S-сигнала или S-сигнального сообщения. Используется для их представления в S-машинах. Предназначен для построения, сохранения, передачи, интерпретации сообщений и манипулирования ими в S-среде. Цифровое кодирование S-символов и S-символьных сообщений позволяет применять методы решения задач, которые можно представить в виде программ, рассчитанных на выполнение цифровыми S-машинами. При цифровом кодировании S-символам ставят во взаимно однозначное соответствие числа, которые можно эффективно представить в памяти S-машины. Цифровое кодирование S-сигналов и S-сигнальных сообщений [с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП)] – в основе построения современных систем связи, обработки данных и др.

S-сигналом называем физически реализованное представление S-символа (или S-символьного сообщения), S-кода (или S-кодowego сообщения),

¹Статья получена 3 ноября 2023.

А. В. Ильин, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (e-mail: avi1975@mail.ru)

В. Д. Ильин, Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” (e-mail: vdilyin@yandex.ru)

²Исследование проводилось в рамках НИР «Математические методы анализа данных и прогнозирования» (шифр: 0063-2019-0003, № госрегистрации: АААА-А19-119091990038-2), выполняемой в соответствии с государственным заданием ФАНО России для Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН.

рассчитанное на передачу, приём, распознавание и интерпретацию S-машиной или человеком. В S-среде человек (или робот) получает S-сообщения, реализованные в виде оптических, звуковых и др. S-сигналов. Технические устройства S-машин рассчитаны на работу с оптическими (напр., цифровые фото- и видеокамеры), электрическими (напр., микропроцессоры S-машин) и др. S-сигналами.

В теории S-символов S-объект рассматривается как отображение некоторого предмета изучения в S-среду, выполненное при заданных ограничениях. Не предполагается никаких ограничений на природу и масштабы отображаемых предметов. Они могут быть природными или созданными людьми, могут иметь любую физическую сущность и масштабы. Доминирующая роль S-объектов в интеллектуальной деятельности определяется не только их компактностью и выразительностью, но и тем, что затраты на построение, преобразование, распознавание, интерпретацию, конструирование, передачу, сохранение и накопление S-объектов несопоставимо меньше, чем аналогичные затраты, связанные с несимвольными моделями (напр., макетами судов, зданий и др.).

Процессы изобретения и применения S-объектов – ключевые средства развития интеллекта.

В области *автоматизации программирования* наиболее известным результатом реализации S-символьного представления задач стала система автоматизированного конструирования программ на основе знаний о программируемых задачах [13-15], первая версия которой получила название системы порождения программ [13]. Порождение – это процесс продуцирования целевых систем с заданными характеристиками на основе других систем, называемых *порождающими*. Искомая система получается как результат конструктивного доказательства её существования, выполняемого порождающей системой. Среда порождения программ изучается как S-среда поддержки процессов формирования и реализации замысла разработчиков целевых систем. Она представляет собой совокупность взаимодействующих целевых систем, в которой уже произведённые системы помогают разработчикам порождать новые. Методология порождения программ включает теоретические основы порождения целевых программных систем, описание языков специфицирования и программирования, ориентированных на порождение программ с заданными характеристиками.

1.А. S-представление текста

Для записи формул, выделения определений, замечаний и примеров используются средства языка TSM-комплекса (TSM: textual symbolic modeling), разработанного для S-представления текстов³.

В статье применены следующие средства выделения фрагментов текста:

□ <фрагмент описания> □ ≈ утверждение (определение, аксиома и др.) (здесь и далее символ ≈ заменяет слово «означает»);

◇ <фрагмент описания> ◇ ≈ замечание;

○ <фрагмент описания> ○ ≈ пример.

Для теоретико-множественных формул применяется следующая форма записи:

$A * B \approx$ декартово произведение множеств

A и B;

$R \leq A * B \approx$ бинарное отношение, заданное на множествах A и B;

$0 \approx$ пустое множество.

Курсивом выделены первые вхождения названий понятий и фрагменты описания, к которым авторы хотят привлечь внимание.

II. ИНТЕЛЛЕКТ: АБСТРАКТНОЕ МЫШЛЕНИЕ, ИНТУИЦИЯ И ЛОГИЧЕСКИЙ ВЫВОД

□ *Интеллект* – комплекс способностей, обладатель которого умеет:

- выбирать цели;
- познавать себя и окружение;
- формировать адаптивные системы правил;
- при достижении выбранных целей изобретать и/или осваивать методы и средства решения необходимых задач (распознавания образов, построения и применения систем понятий и др.);
- изобретать, строить и применять искусственные усилители природных способностей (средства повышения эффективности интеллектуальной деятельности, энергетические системы и др.);
- действовать интуитивно (по обстановке, в условиях неполной информированности). □

◇ В этом списке указаны лишь часть способностей обладателя интеллекта (то есть, список не является исчерпывающим). ◇

Человек входит в систему «Человечество», связан с нею многими естественными и искусственными средствами взаимодействия. Его интеллектуальные способности опираются на арсеналы знаний и умений, накопленных «Человечеством».

Человек наделён сенсорным комплексом (зрение, слух, осязание, обоняние, вкус), который «Человечество» расширило многими искусственными сенсорами, рассчитанными на восприятие *визуальных, аудио, тактильных, запаховых и вкусовых S-символов* [6-7]. Человек с интеллектуальными способностями не только пользуется методами S-символьного представления сущностей, но и участвует в изобретении расширений арсенала S-символьной среды поддержки интеллектуальной деятельности. В этой деятельности сформировалось и продолжает совершенствоваться *абстрактное мышление*, (включающее *интуицию* и *логический вывод*) от эффективности которого зависят судьбы открытий и изобретений.

□ *Интуиция* – механизм построения, сохранения и сортировки подходов к решению задач, действующий во взаимодействии с механизмом логического вывода. □

Интуитивно решаемая задача может принадлежать произвольной предметной области (диагностика,

³ Символьное моделирование (S-моделирование) // Энциклопедия Руниверсалис [https://пуни.рф/Символьное_моделирование_\(S-моделирование\)](https://пуни.рф/Символьное_моделирование_(S-моделирование)).

распознавание образов или др.) и иметь любые степени сложности и определённости.

По степени определённости интуитивно решаемая задача может быть:

- *хорошо определённой* {есть постановка задачи [определены вход (что дано), выход (что требуется найти)] и условия, связывающие компоненты входа и выхода}, требуется найти метод решения};
- *плохо определённой* (нет завершённой постановки задачи: определён выход, но не полностью определён вход и условия, связывающие вход и выход; в этом случае требуется завершить постановку задачи, а затем найти метод её решения);
- *неопределённой* (нет постановки задачи; в этом случае ищется постановка задачи, а затем метод решения).

◇ Эффективность функционирования интуиции зависит от сформированных правил, применяемых при решении задач, накопленных в памяти *систем понятий, механизмов интерпретации сообщений на системах понятий* [6-7] и других ресурсов интеллекта. ◇

□ **Логический вывод** – составляющая абстрактного мышления, предназначенная для основанного на знаниях логически упорядоченного поиска решений среди вариантов, порождаемых *интуицией*. □

Продуктивность абстрактного мышления существенно зависит от S-символьного представления задач.

III. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАДАЧ В S-СИМВОЛЬНОЙ СРЕДЕ

□ **S-задача** $\approx \{Formul, Rulsys, Alg, Prog\}$, где:

- *Formul* – постановка S-задачи $\approx \{Mem, Rel\}$, где *Mem* – множество понятий задачи, на котором задано разбиение $Mem = Inp \cup Out$ ($Inp \cap Out = 0$), а *Rel* – семейство связей между понятиями, определяющий бинарное отношение $Rel \leq Inp * Out$ (*Mem* называем *памятью задачи*, а *Inp* и *Out* – её *входом* и *выходом*, значения которых предполагается соответственно задавать и искать);
- *Rulsys* – множество систем *обязательных и ориентирующих требований к решению* (обязательные – не могут быть нарушены, а ориентирующие – выполняются в зависимости от их приоритетов);
- *Alg* – объединение множеств алгоритмов, каждое из которых соответствует одному элементу из *Rulsys*;
- *Prog* – объединение множеств *S-программ*, каждое из которых поставлено в соответствие одному из элементов множества *Alg*. □ [6-7]

◇ В общем случае множества *Rulsys*, *Alg* и *Prog* могут быть пустыми: числа их элементов зависят от степени изученности S-задачи. ◇

Для каждого элемента из *Rulsys*, *Alg* и *Prog* задано *описание применения (Ud)*:

- *Ud* элементов множества *Rulsys* включают спецификацию типа *решателя задачи* (о автономная S-машина [6-7], сетевая кооперация S-машин, кооперация <человек – S-машина> и др. о), требование к информационной безопасности и др.;
- *Ud* элементов множества *Alg* включают данные о допустимых режимах работы решателя S-задачи

(о автоматический локальный, автоматический распределённый, интерактивный локальный и др. о), об ограничениях на время получения решения и др.;

• *Ud* элементов множества S-программ *Prog* включают данные о языках программирования, операционных системах и др.

◇ Каждая S-программа сопровождается ссылками на её применения и наборы тестовых примеров. ◇

Взаимодействие механизмов логического вывода и интуиции можно представить в виде иерархии *клиент-серверных архитектур* (см. раздел "Сетевые архитектуры" в статье "Компьютерная сеть"⁴). При этом масштабы и производительность всего, что относится к механизму интуиции, гораздо значительнее относящегося к механизму логического вывода.

Концентрация на сути задачи. *Способность концентрироваться* зависит от целеустремлённости решателя задачи и её S-символьного представления. Необходимым (но не достаточным) условием получения интуитивного решения является концентрация на вопросах: «Что требуется найти?», «Что дано?», как они связаны между собой. Особенно важно сосредоточиться на том, «Что требуется найти?». Чем сильнее сосредоточенность и удачнее S-символьное представление задачи, тем больше оснований получить решение. От концентрации и S-представления задачи зависит качество сформированного запроса и точность его адресации при отправке на обработку механизмом интуиции. Что, в свою очередь, во многом определяет успех маршрутизации сообщения-запроса, его распознавания и последующей интерпретации. Серверы интуиции возвращают результаты обработки запросов, которые буферизируются в памяти. Так как буферы памяти под контролем механизма логического вывода имеют весьма ограниченные объёмы, необходимо своевременно сканировать их.

Качество механизма интуиции. Конечным продуктом интуиции является подход к решению (то есть ответ на вопрос «С чего начать решение задачи?»). Иногда интуиция выдаёт не сам подход или метод, а лишь идею, определяющую некоторое множество подходов, среди которых, возможно, находится искомый. Выбор из этого множества реализуется в различных режимах: и без участия, и с участием механизма логического вывода.

Соотношение числа правильных и неправильных подходов к решению (на представительном множестве попыток) характеризует *качество механизма интуиции*.

Интуитивный подход к решению может быть получен мгновенно, для его получения может потребоваться заметное время, он может быть результатом многократных попыток решить задачу в течение длительного времени.

IV. ОБ ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ

Изучение естественного комплекса, обеспечивающего способности, отнесённые к интеллектуальным, – давняя задача постоянно высокой актуальности [16-17]. Однако, нет оснований полагать,

⁴ Компьютерная сеть // Энциклопедия Универсалис https://руни.рф/Компьютерная_сеть.

что, имитируя естественный комплекс, можно получить наилучшие результаты.

Рассуждать об изобретении искусственного интеллекта, не учитывая вышесказанное, – опрометчивое занятие. Одни исследователи склонны оценивать интеллектуальный уровень по способности решать хорошо определённые задачи, другие – плохо определённые, третьи – их сочетание.

◊ В любом случае при оценке интеллектуальных способностей необходимо *определить классы и уровни сложности тестовых задач*. ◊

Вслед за А. Тьюрингом⁵ часть исследователей продолжает задаваться вопросом: можно ли создать «думающую машину», поведение которой невозможно отличить от поведения разумного человека? Зададим встречные вопросы:

- какого человека (по интеллектуальному потенциалу, зависящему от способностей познавать, изобретать, обучаться и т. д.)?

- к каким предметным областям будут относиться тестовые вопросы?

У разных решателей задач (людей и интеллектуальных роботов) весьма различны способности выбирать цели; разворачивать их в комплексы задач, решение которых позволяет достичь поставленные цели; формировать адаптивные системы правил и следовать им; маскировать истинные намерения и распознавать подобный маскарад, применяемый другими и т. д.

Есть основания полагать, что для создания S-машинного комплекса, имитирующего поведение человека с определёнными интеллектуальными способностями, необходимо изобрести, реализовать и объединить следующие S-машинные системы:

- восприятия сообщений [по каналам, аналогичным человеческим: зрение, слух, осязание, обоняние, вкус и другим (которые, возможно, будут ещё открыты)];

- порождения и передачи внутренних сообщений (связанных с инстинктами самосохранения и др.);

- интерпретации внутренних и внешних сообщений;

- реагирования на результаты интерпретации сообщений;

- порождения целей [внутренних (направленных на адаптивное самоизменение) и внешних] и развёртки их в комплексы задач.

И это не исчерпывающий список того, что требуется для построения некоторой функциональной аналогии человеческого интеллекта.

IV.A.1) Сравнение интеллектуальных способностей людей и интеллектуальных роботов

При сравнении способностей людей и разумных S-машин должны использоваться тестовые задачи определённых классов. Естественно, что люди, участвующие в тестах, должны быть подготовлены к решению задач этих классов.

Приведём пару поясняющих примеров.

1. Шахматные программы всё чаще выигрывают даже у чемпионов мира. Проводятся чемпионаты мира среди шахматных программ. Любая из таких программ с успехом пройдёт и *тест А. Тьюринга*, если речь идёт об обладателях способностей, необходимых для игры в шахматы.

2. Компания IBM создала *суперкомпьютер Watson*, который умеет отвечать на вопросы типа тех, что задают в известной тв-игре «Своя игра». Watson победил лучших «знатоков» США (в США эта игра называется Jeopardy). Вот цитата из сообщения об этом событии: «В США завершился необычный игровой телевизионный проект, после которого многие приверженцы верховенства разума человека над машинным интеллектом, вероятно, серьёзно усомнились в правоте своей точки зрения. В Штатах завершилась серия из трёх телевизионных игр под названием Jeopardy»⁶. Легко пройдёт тест А. Тьюринга и суперкомпьютер Watson, если тестировать обладателей способностей отвечать на вопросы типа задаваемых в упомянутой игре.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен основанный на *теории S-символов* [6-7] подход к *S-символьному представлению задач (S-задач)*, относящихся к искусственному интеллекту. Приведено *определение S-задачи*, уровни сложности и определённости которой могут быть произвольными (задаются *системами обязательных и ориентирующих требований* к решению и *условиями применения*). Даны *функциональные определения интеллекта* и средств его реализации (*механизмов интуиции и логического вывода*). Приведены основные характеристики *S-(символьно-кодowo-сигнальной) среды (S-среды)* для представления, преобразования, конструирования, передачи, сохранения и решения ии-задач. Обоснована точка зрения авторов на проблему построения и применения систем искусственного интеллекта, реализуемых в S-среде. Приведён критический анализ теста А. Тьюринга и сформулированы требования к ии-задачам, используемым в подобных тестах.

VI. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. 2020. Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance. Appl. Sci., 11(1), 31 pp. DOI: 10.3390/app11010031.
 [2] Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. 2021. Digital twin paradigm: A systematic literature review. Comput. Ind., 130, 103469, 23 pp. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.

⁶ Guizzo E. IBM's Watson Jeopardy Computer Shuts Down Humans in Final Game > Silicon prevails in men vs. machine challenge. IEEE Spectrum, 2011, 17 Feb. <https://spectrum.ieee.org/ibm-watson-jeopardy-computer-shuts-down-humans#toggle-gdpr>

⁵ Тьюринг, Алан // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.рф/Тьюринг,_Алан

- [3] Nguyen H., Trestian R., To D., Tatipamula M. 2021. Digital twin for 5G and beyond. *IEEE Commun. Mag.*, 59(2), 10–15. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000343.
- [4] Jia P., Wang X., Shen X. 2021. Digital-twin-enabled intelligent distributed clock synchronization in industrial IoT systems. *IEEE Internet Things*, 8(6), 4548–4559. DOI: 10.1109/IJOT.2020.3029131.
- [5] Ball P., Badakhshan E. 2022. Sustainable Manufacturing Digital Twins: A Review of Development and Application. In: Scholz S. G., Howlett R. J., Setchi R. (eds). *Sustainable Design and Manufacturing. KES-SDM 2021. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 262. Springer, Singapore. DOI :10.1007/978-981-16-6128-0_16.
- [6] Ильин В. Д. 2023. Теория S-символов: концептуальные основания. Системы и средства информатики, 33(1), 126–134. DOI: 10.14357/08696527230112.
- [7] Ильин В. Д. 2023. Теория S-символов: формализация знаний об S-задачах. Системы и средства информатики, 33(1), 124–131. DOI: 10.14357/08696527230212 .
- [8] Kim R. Y. 2011. Efficient Wireless Communications Schemes for Machine to Machine Communications. In: Zain J. M., Wan Mohd W. M. b., El-Qawasmeh E. (eds). *Software Engineering and Computer Systems. ICSECS 2011. Communications in Computer and Information Science*, vol 181. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-22203-0_28.
- [9] Lien S. Y., Liao T. H., Kao C. Y., et al. 2012. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications. *IEEE T. Wirel. Commun.*, 11(1), 27–32. DOI: 10.1109/TWC.2011.111611.110350.
- [10] Wei Y., Blake M. B. 2010. Service-oriented computing and cloud computing: Challenges and opportunities. *IEEE Internet Comput.*, 14(6), 72–75. DOI: 10.1109/MIC.2010.147.
- [11] Perera C., Liu C. H., Jayawardena S. 2015. The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE T. Emerging Topics Computing*, 3(4), 585–598. DOI: 10.1109/TETC.2015.2390034.
- [12] Ilyin V. D. 2022. Symbolic Modeling (S-Modeling): an Introduction to Theory. In: Silhavy, R. (eds). *Artificial Intelligence Trends in Systems. CSOC 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 502, 585–591. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-09076-9_54.
- [13] Ильин В. Д. 1989. Система порождения программ. М.: Наука. 264 с. ISBN: 5-02-006578-1.
- [14] Ильин А. В. 2007. Конструирование разрешающих структур на задачных графах системы знаний о программируемых задачах. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 3, 30–36.
- [15] Ilyin A. V., Ilyin V. D. 2021. Updated methodology for task knowledge based development of parallel programs. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (eds.). *CoMeSySo 2021. LNNS*. Vol. 231, 319–328. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-90321-3_25.
- [16] Walter W. G. 1953. *The living brain*. New York, Norton. 311 p.
- [17] Freeman W. J. 1986. W. G. Walter: *The Living Brain*. In: Palm G., Aertsen A. (eds). *Brain Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-70911-1_17.

S-symbolic environment of artificial intelligence

A. V. Ilyin, V. D. Ilyin

Abstract – The review presents the conceptual foundations of the use of S-(symbol-code-signal) environment (S-environment) as the infrastructure basis of artificial intelligence systems. S-(symbols, codes, signals) and S-(symbolic, code and signal) constructions, their properties, relationships and methods of construction are studied in the theory of S-symbols, which serves as the methodological basis for construction of the S-environment. The definition of intelligence is given, the functioning of the mechanisms of intuition and logical inference in the processes of solving well and poorly defined S-problems is considered. The definition of S-problem as an object of representation in the S-environment of the functioning of artificial intelligence systems is given. The authors' point of view to artificial intelligence is presented. A critical analysis of the A. Turing test is given and the requirements for such tests are formulated.

Keywords – S-symbol, S-code, S-signal, S-environment, S-problem, intelligence, artificial intelligence, representation of S-problems in S-environment.

VII. REFERENCES

1. Rojek, I., Mikotajewski, D., Dostatni, E. 2020. Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance. *Appl. Sci.*, 11(1), 31 pp. DOI: 10.3390/app11010031.
2. Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M. 2021. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Comput. Ind.*, 130, 103469, 23 pp. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.
3. Nguyen, H., Trestian, R., To, D., Tatipamula, M. 2021. Digital twin for 5G and beyond. *IEEE Commun. Mag.*, 59(2), 10–15. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000343.
4. Jia, P., Wang, X., Shen, X. 2021. Digital-twin-enabled intelligent distributed clock synchronization in industrial IoT systems. *IEEE Internet Things*, 8(6), 4548–4559. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3029131.
5. Ball, P. & Badakhshan, E. 2022. Sustainable Manufacturing Digital Twins: A Review of Development and Application. In: Scholz S. G., Howlett R. J., Setchi R. (eds). *Sustainable Design and Manufacturing. KES-SDM 2021. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 262. Springer, Singapore. DOI :10.1007/978-981-16-6128-0_16.
6. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: kontseptual'nyye osnovaniya [Theory of S-symbols: Conceptual foundations] *Sistemy i Sredstva Informatiki* [Systems and Means of Informatics], 33(1). 126–134. DOI: 10.14357/08696527230112.
7. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: formalizatsiya znaniy ob S-zadachakh [Theory of S-symbols: Formalization of knowledge about S-problems] *Sistemy i Sredstva Informatiki* [Systems and Means of Informatics], 33(1), 124–131. DOI: 10.14357/08696527230212.
8. Kim, R. Y. 2011. Efficient Wireless Communications Schemes for Machine to Machine Communications. In: Zain J. M., Wan Mohd W. M. b., El-Qawasmeh E. (eds). *Software Engineering and Computer Systems. ICSECS 2011. Communications in Computer and Information Science*, vol 181. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-22203-0_28.
9. Lien, S. Y., Liao, T. H., Kao, C. Y., et al. 2012. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications. *IEEE T. Wirel. Commun.*, 11(1), 27–32. DOI: 10.1109/TWC.2011.111611.110350.
10. Wei, Y. & Blake, M. B. 2010. Service-oriented computing and cloud computing: Challenges and opportunities. *IEEE Internet Comput.*, 14(6), 72–75. DOI: 10.1109/MIC.2010.147.
11. Perera, C., Liu, C. H., Jayawardena, S. 2015. The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE T. Emerging Topics Computing*, 3(4), 585–598. DOI: 10.1109/TETC.2015.2390034.
12. Ilyin, V. D. 2022. Symbolic Modeling (S-Modeling): an Introduction to Theory. In: Silhavy, R. (eds). *Artificial Intelligence Trends in Systems. CSOC 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 502, 585–591. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-09076-9_54.
13. Ilyin, V. D. 1989. Sistema porozhdeniya programm [Program generating system]. Nauka, Moscow. 264 p. ISBN: 5-02-006578-1.
14. Ilyin, A. V. 2007. Konstruirovaniye razreshayushchikh struktur na zadachnykh grafakh sistemy znaniy o programmiruyemykh zadachakh [Construction of resolving structures on problem graphs of the knowledge system about programmable tasks], *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy* [Information Technologies and Computing Systems], 3, 30–36.
15. Ilyin, A. V. & Ilyin, V. D. 2021. Updated methodology for task knowledge based development of parallel programs. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (eds.). *CoMeSySo 2021. LNNS. Vol. 231*, 319–328. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-90321-3_25.
16. Walter, W. G. 1953. *The living brain*. New York, Norton. 311 p.
17. Freeman, W. J. 1986. W. G. Walter: *The Living Brain*. In: Palm G., Aertsen A. (eds). *Brain Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-70911-1_17.

A. V. Ilyin. Candidate of Science (PhD) in technology, State Research Institute of Aviation Systems, 7 Viktorenko str., Moscow, 125319, Russia, e-mail: avi1975@mail.ru.

V. D. Ilyin. Doctor of Science in technology, Professor, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, e-mail: vdilyin@yandex.ru.